

МОДУЛЯТОР МАЛЫХ ПОСТОЯННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КРЕМНИЕВЫХ ТРИОДАХ

М. С. РОЙТМАН, А. Г. ВАЙСБУРД

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Модуляторы малых постоянных напряжений на полупроводниковых триодах, несмотря на сравнительное обилие различных схемных исполнений, выполняются по двум путям: путем стабилизации режимов работы транзистора [1] или путем тщательного подбора триодов с целью взаимокompенсации остаточных параметров U_p и I_p [2, 3 и др.].

В первом случае необходимо коммутацию осуществлять прямоугольным стабилизированным напряжением и жестко стабилизировать температуру триода [1], что весьма нежелательно.

Во втором — требуется проводить тщательную отбраковку триодов [2, 3], что в условиях серийного производства также нежелательно, а зачастую и недопустимо.

Очевидно, что наилучшим решением явилось бы построение модулятора с малым дрейфом нуля, большим входным сопротивлением, способного работать в широком диапазоне температур, но без необходимости при этом стабилизации температуры триодов или их специальной отбраковки. Ниже приводится один из возможных вариантов такого построения модулятора, в частности, на базе общеизвестной схемы (рис. 1, а) [4].

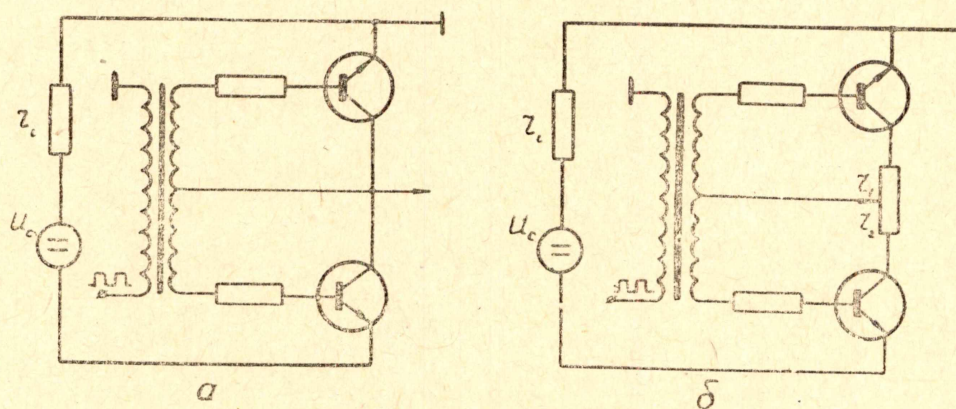


Рис. 1.

Напряжение на выходе такого модулятора при отсутствии входного сигнала равно

$$U_{\text{вых}}(t) \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{U_{p_1} - I_{p_2} r_i - U_{p_2}}{n} \left\{ \left[1 - 2 \left(\pi \frac{\Delta T}{T} \right)^2 \cdot \sin n \omega t + \right. \right. \\ \left. \left. + 2\pi \frac{\Delta T}{T} \cos n \omega t \right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{T} \left[\int_0^{\tau_1} U_{b_1}(t) e^{-jn\omega t} dt + \right. \right. \\ \left. \left. \int_{\frac{T}{2} + \Delta T + \tau_2}^{\frac{T}{2} + \Delta T} U_{b_2}(t) e^{-jn\omega t} dt \right] \cdot e^{jn\omega t} \right\},$$

где U_{p_1} и U_{p_2} — остаточные напряжения первого и второго триодов;
 I_{p_2} — остаточный ток второго триода;
 r_i — внутреннее сопротивление источника;
 $U_{b_1}(t)$, $U_{b_2}(t)$ — напряжение выбросов, возникающих при запираании триодов;
 τ_1 , τ_2 — длительность выбросов;
 T — длительность периода;
 $\frac{\Delta T}{T}$ — относительное неравенство полупериодов.

Считая выбросы прямоугольными, $U_{b_1} = U_{b_2} = U_b$ и $\frac{\Delta T}{T} \ll 1$, можем определить напряжение первой гармоники частоты коммутации при отсутствии входного сигнала (часто это напряжение именуют „ложным сигналом“)

$$U_{\text{л.с.}} \approx \frac{\sqrt{2}}{\pi} (U_{p_1} - I_{p_2} r_i - U_{p_2}) \left[1 - 2 \left(\pi \frac{\Delta T}{T} \right)^2 \right] \sin \omega t + \\ + 2\pi^2 \left[\frac{\tau_1 - \tau_2}{T} \cdot \frac{\tau_1 + \tau_2}{T} - \frac{2\Delta T \tau_2}{T^2} \right] \cdot \sin \omega t \cdot U_b + 2\pi \frac{\tau_1 - \tau_2}{T} U_b \cos \omega t.$$

Остаточное напряжение U_p равно [5]

$$U_p = \frac{kT}{q} m \ln \frac{1 + \beta}{\beta} + I_6 r_k,$$

где k — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура;

q — заряд электрона (для комнатной температуры $\frac{kT}{q} \approx 26$ мв);

β — усиление триода по току в схеме с общим эмиттером;

I_6 — ток базы (он равен току коммутации);

r_k — сопротивление полупроводника коллектора;

m — постоянная, определяемая плотностью инжектированного тока в области базы.

Для сплавных германиевых транзисторов (П13÷П16) $m \approx 1$, $r_k < 0,2$ ом и U_p для качественных триодов находится в пределах $0,3 \div 0,6$ мв. Для кремниевых триодов $m \approx 1,5 \div 2$, $r_k < 1,2$ ом и $U_p = 0,6 \div 3$ мв.

Очевидно, что с точки зрения величины U_p предпочтение следует отдавать германиевым триодам. Однако у германиевых триодов $I_p \geq 2 \cdot 10^{-8}$ а (при 20°C) и дрейф нуля при сопротивлении источника в несколько десятков ом весьма существенно зависит от неустойчивости I_p (I_p меняется на $7 \div 8$ % на 1°C).

Влияние I_p можно исключить, осуществляя коммутацию униполярным напряжением. Но в этом случае входное сопротивление резко падает и модулятор на германиевых триодах становится непригодным для работы на повышенных температурах. Поэтому при необходимости работать в широком диапазоне температур и внутреннем сопротивлении источника больше 50 ом предпочтение следует отдавать кремниевым триодам или применять более сложные схемы модуляторов [3].

Проведенные нами исследования показали, что из отечественных кремниевых триодов наилучшими характеристиками обладают МП103А. В табл. 1 приведены данные величины α , U_p и I_p для шести штук МП103А.

Таблица 1

№ триодов	1	2	3	4	5	6	
α	0,978	0,994	0,972	0,983	0,981	0,988	$t = 20^\circ\text{C}$
$U_{p\text{мв}}$	1,4	0,8	1,3	1,2	1,2	1,1	$I_0 = 500 \text{ мка}$ $U_0 = 450 \text{ мв}$
$I_p \cdot 10^9 \text{ а}$	2	0,5	1,5	4	1	0,25	$t = 60^\circ\text{C}$ $U_0 = 450 \text{ мв}$

Зависимости U_p и I_p от коммутирующего тока (I_0) и напряжения (U_0) даны на рис. 2, а, б.

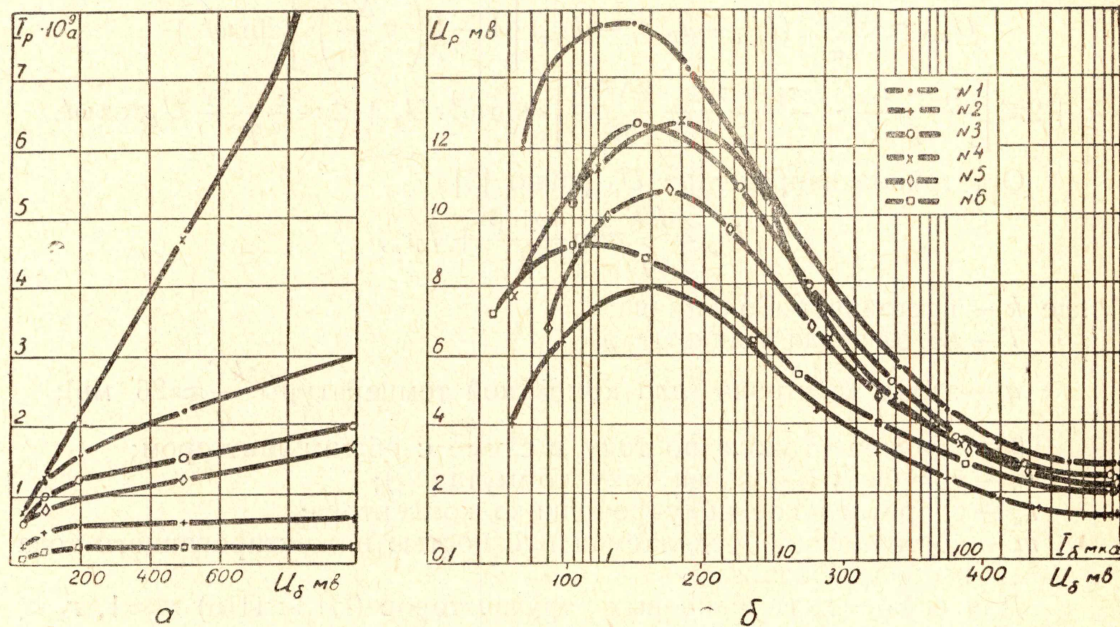


Рис. 2.

Поскольку для $t = 60^\circ\text{C}$ $I_p \leq 5 \cdot 10^{-9}$ а, то при $r_i \leq 5$ ком на низких частотах $U_{л.с.} \approx (U_{p1} - U_{p2}) \frac{\sqrt{2}}{\pi}$. Если последовательно с коллекторами включить сопротивления (рис. 1, б), то

$$U_{л.с.} \approx (U_{p1} + I_k r_1 - U_{p2} - I_k r_2).$$

Очевидно, что если $|U_{p1} - U_{p2}| < I_k(r_1 + r_2)$, то меняя соотношение между r_1 и r_2 , т. е. регулируя потенциометр R , можно свести $U_{л.с.}$ к весьма малой величине.

Однако I_k является функцией коммутирующего напряжения U_k , а $U_p = f(U_k, T)$.

Для оценки реальной величины дрейфа нуля U_d , т. е. изменения $U_{л.с.}$, необходимо определить влияние различных факторов, прежде всего, изменения температуры и коммутирующего напряжения. Зависимости $U_{л.с.} = f(t^\circ\text{C})$ для различных триодов, использованных в практической схеме модулятора (рис. 3) даны в табл. 2.

Таблица 2
 $U_d^{\text{мкВ}} = f(t^\circ\text{C})$

	22	35	40	50	60
4и1	0	—	—	—	10
4и3	0	15	15	18	18
4и5	0	0	0	2,5	7,5
4и6	0	0	0	—	6
4и2	0	—5	—7,5	—10	—11
1и2	0	—	30	—	66

Экспериментальные данные подтверждают очевидное предположение, что наибольшим дрейфом обладают пары триодов с максимальным отличием остаточных напряжений U_p (табл. 1). У триодов 1 и 2 весьма существенное различие в коэффициентах усиления по току. Отношение $\frac{\beta_2}{\beta_1} > 3,7$ намного превышает допустимое ГОСТом значение для триодов одной группы. Экспериментальная проверка показала, что, если брать триоды МП103А с $\beta_{\text{мин}} \geq 40$ и отношением $\frac{\beta_{\text{макс}}}{\beta_{\text{мин}}} \leq 2$, то при

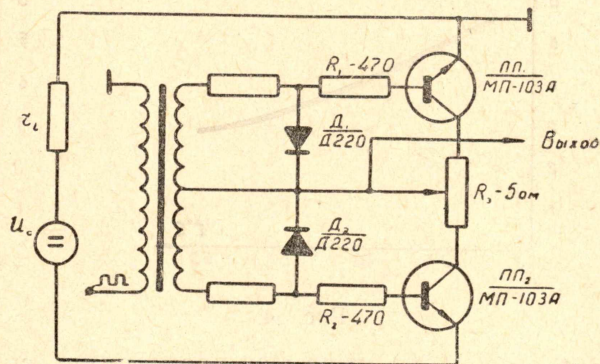


Рис. 3.

любых комбинациях триодов и условий коммутации номинальным током дрейф нуля от нагрева до 60°C меньше 30 мкВ (практически находится в пределах ± 20 мкВ).

За номинальное значение коммутирующего тока I_6 нами принято 0,5 ма.

Меньшая величина I_6 , как следует из зависимости $U_p = f(I_6)$ (рис. 2, а), нежелательна. Увеличение I_6 не приводит к существенному уменьшению U_p , но в то же время вызывает возрастание длительности и амплитуды выбросов при выходе триодов из насыщения¹⁾.

¹ Оптимальное значение I_6 определяется не только указанными факторами, но и температурными зависимостями $U_p = f(t^\circ\text{C})$ для заданного тока I_6 .

При малых токах коммутации температурный коэффициент U_p отрицателен, при больших ($I_6 > 2$) — положителен и, очевидно, в некотором промежутке значений I_6 он минимален.

Изменения коммутирующего напряжения U_k на $\pm 5\%$ приводят к дрейфу нуля не более ± 15 мкв.

Диоды Д220 применены для уменьшения влияния изменений U_k , а также для улучшения формы кривой напряжения при наличии искажений трансформатора.

Предпочтение отдано диодам Д220, поскольку у них малое динамическое и значительное статическое сопротивления (при токе $2\div 5$ ма $r_d \approx 10$ ом, $r_{ст} \approx 150$ ом) и прямое напряжение, близкое к оптимальной величине ($U_{гр} = 0,7\div 0,8$ в).

Нестабильность коэффициента преобразования входного напряжения практически определяется лишь нестабильностью скважности коммутирующего напряжения.

Если к выходу модулятора подключен усилитель с малым фазовым сдвигом в полосе частот и усиленное напряжение выпрямляется синхронным детектором, коммутирующее напряжение на который подается от того же источника, что и на модулятор, то девиация скважности не меняет коэффициента преобразования входного сигнала.

Входное сопротивление модулятора $R_{вх} \geq 5$ мом и зависит как от режима работы триодов, так и от температуры окружающей среды. Усредненная зависимость $R_{вх} = f(t^\circ C)$ дана на рис. 4.

С увеличением частоты выходное сопротивление падает (рис. 5). Это обусловлено тем, что при крутых фронтах коммутирующего напряжения ($t_{\phi+} < t_n$

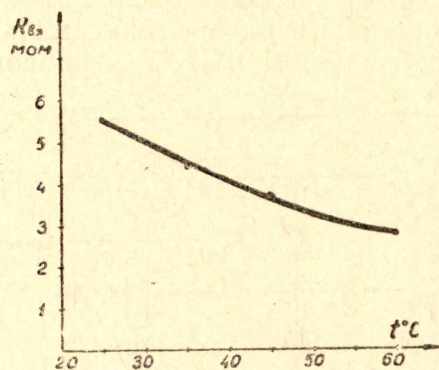


Рис. 4.

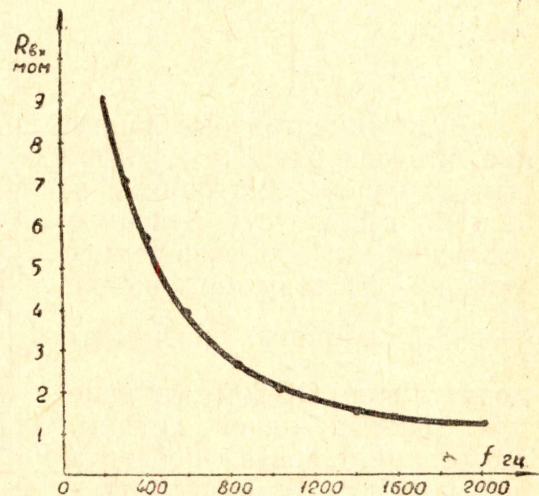


Рис. 5.

и $t_{\phi-} < t_p + t_c$) имеем существенную сквозную проводимость модулятора в течение промежутка времени τ , примерно равного

$$t_p + t_c - t_n.$$

где t_n — время нарастания коллекторного тока;

t_p , t_c — соответственно время рассасывания неосновных носителей в базе и время спада.

Очевидно, что с увеличением частоты увеличивается отношение $\frac{\tau}{T}$, где T — длительность периода.

При коммутации триодов синусоидальным напряжением входное сопротивление на частотах $f \geq 400$ гц выше, однако, существенно увеличивается дрейф нуля ($\pm 50\div 60$ мкв) и содержание гармоник на выходе модулятора вследствие возможной неидентичности триодов.

Нами не было проведено детального исследования $U_p(t^\circ C)$ в функции от I_b для триодов МП103А, хотя выполнение такой работы весьма желательно.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. C. Hutcheon, D. Hemmers. A low — drift transistor chopper — type — D. C. amplifier with high gain and large dynamic range. IEE.
 2. Н. С. Николаенко, В. П. Федотов. Проектирование преобразователей малых сигналов постоянного тока на полупроводниковых триодах. Известия ВУЗов, Приборостроение. № 2. 1962.
 3. М. С. Ройтман, А. Н. Кармадонов, Ю. С. Рябинкин, С. А. Гофман. Преобразователи малых э.д.с. постоянного тока на полупроводниковых приборах. Труды II конференции по автоконтролю и электрометрии, Изд. СО АН СССР, Новосибирск, 1962.
 4. R. L. Bright, A. P. Kruger. Electronics, 28, № 4. p. 135—137, 1955.
 5. Дж. Каррол. Электронные схемы на полупроводниковых триодах. стр. 71—79, издательство иностранной литературы, 1959.
-